放牧对荒漠灌丛草地土壤团聚体组成及其稳定性的影响

祁正超[1]， 常佩静[2,3]， 李永善[4]， 田雪梅[5]， 李旭东[1]， 郭 丁[1]， 牛得草[1]

（1. 草地农业生态系统国家重点实验室 兰州大学草地农业科技学院，草业科学国家级实验教学示范中心（兰州大学），甘肃 兰州 730020；2. 内蒙古自治区阿拉善盟气象局，内蒙古 巴彦浩特 750306；3. 内蒙古自治区荒漠生态气象中心，内蒙古 巴彦浩特 750306；4. 内蒙古自治区李井滩气象站，内蒙古 嘉尔嘎勒赛汉 750312；5. 内蒙古自治区阿拉善盟草原工作站，内蒙古 巴彦浩特 750306）

摘 要：以内蒙古阿拉善盟荒漠草地为研究对象，分析了不同放牧强度对土壤理化性质、团聚体组成、养分含量及其稳定性的影响。结果表明：与轻度放牧相比，重度放牧使0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm土层土壤有机C和全N含量显著降低，土壤容重显著增加；各土层中土壤团聚体以0.053~0.25 mm粒径为主，放牧强度的增加造成土壤团聚体平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）值降低，分形维数（D）值升高，土壤团聚体结构遭受破坏，稳定性降低，导致土壤团聚体由大粒径团聚体（0.25~2 mm）向小粒径团聚体(0.053~0.25 mm、<0.053 mm)转变；重度放牧使土壤团聚体的C/N值升高，造成有效养分难以释放，植物所需养分亏缺。说明重度放牧是造成阿拉善盟荒漠草地退化的重要因素。

关键词：放牧强度；土壤团聚体；稳定性；土壤养分

放牧是草地的主要利用方式之一[1]，并以不同的方式影响着草地土壤的理化性质。不同放牧强度对草地植被和土壤有机C以及土壤团聚体C有着不同的影响。许多研究表明，草地植物群落的变化与放牧强度密切相关，其中过度放牧是导致草地退化的最主要原因[2]。另外，放牧强度也是引起土壤有机C含量变化的主要因素，一方面由于家畜的采食减少了植物向土壤的C归还量[3]；另一方面，过度放牧会改变土壤的理化性质，进而导致土壤有机C的损失。

土壤团聚体作为土壤基本的物质和功能单元，是由矿质颗粒和有机质通过土壤微生物、冻融干湿交替等自然物理过程协同作用形成的不同尺度的多孔结构体[4]。土壤团聚体对有机C具有物理保护作用[5]，将有机C与微生物隔离开，保护有机C不被微生物分解，进而得以在土壤中稳定保存和积累。因此，土壤团聚体是土壤重要的肥力基础，常被作为评价土壤质量的重要指标。目前，关于土壤团聚体已开展了许多研究，但大多关注于土地利用方式、耕作等活动对团聚体的影响[6]。虽然，已有放牧对黄土高原林草地土壤团聚体影响的研究报道[7]，但鲜见关于荒漠草地的相关研究。

内蒙古阿拉善盟地处中国西北内陆，该区荒漠草地是畜牧业生产的重要牧草资源。多年来，由于自然因素和人为因素的综合影响，已导致全盟90%以上草地发生退化，草地植被多样性丧失、植被盖度降低，土壤理化性质发生变化[8]。本研究通过分析阿拉善荒漠草地在不同放牧强度下的土壤有机C、N特征、土壤团聚体C的分布特征及其稳定性，旨在为放牧草地土壤质量评价、固C研究以及草地生态恢复工程建设等方面的研究提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于阿拉善左旗巴润别立镇巴音朝格

收稿日期：2020-06-11； **修订日期：**2020-10-15
基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0500506）资助
作者简介：祁正超（1994-），男，硕士研究生，主要从事草地生态系统碳循环研究. E-mail: 925772409@qq.com
通讯作者：李旭东. E-mail: lixudong@lzu.edu.cn

图嘎查，地理坐标为38°9′28.14″N，105°29′38.05″E，海拔1543 m。该区属于典型干旱荒漠气候，年均温度8.1 ℃，≥10 ℃年积温3200~3400 ℃，年均降水量60~150 mm，且70%以上降水集中在7—9月，年均蒸发量3000~4100 mm。土壤为灰棕漠土，主要灌木物种有红砂（*Reaumuria soongorica*）、珍珠（*Salsola passerina*）；草本植物主要有无芒隐子草（*Cleistogenes songorica*）、砾苔草（*Carex stenophylloides*）和画眉草（*Eragrostis poaeoides*）等。

1.2 研究方法

1.2.1 *样地选择* 以牧户居民点旁边的畜圈为起点，以直线方向向外辐射形成一个退化梯度，在该直线上距离畜圈50 m（代表重度放牧样地，HG）、500 m（代表中度放牧样地，MG）、1000 m（代表轻度放牧样地，LG）处，各选择3个50 m×50 m的样地，构成3个放牧强度的处理（3个距离）。每个处理3个重复样地。

1.2.2 *植物群落特征测定* 2018年7月，在每个重复样地中设置一个1 m×1 m的草本样方和10 m×10 m的灌木样方，分别记录样方内草本和灌木物种数及各物种株数，测量每株草本和灌木的高度和灌木冠幅，用针刺法测定样地的草本盖度，用灌木冠幅总和计算灌木盖度。

1.2.3 *土壤样品采集与分析* 2018年7月在每个灌木样方内随机设置3个采样点，用土钻分别采取0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm土样，3个采样点的同一土层土样混合为1个样品，去除植物根系和石块，充分混匀后用四分法取约1 kg的土样带回实验室备用。取样的同时用环刀法（环刀容积100 cm^3）测定各土层土壤容重。

土壤经室内自然风干后，取部分土样研磨过100目筛（0.149 mm）进行土壤有机C和土壤全N的测定；剩余土样过2 mm筛用于土壤团聚体组成及其土壤有机C和全N的测定；土壤团聚体组成采用湿筛法[9]，应用土壤团聚体分析仪（上海，DM200-Ⅲ）进行分析，所用土壤套筛孔径分别为2 mm、0.25 mm和0.053 mm，以获取0.25~2 mm（大团聚体）、0.053~0.25 mm（小团聚体）、<0.053 mm（微团聚体）粒级土壤团聚体重量及所占比重；土壤和各粒级团聚体中土壤有机C采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定，全N采用半微量凯式滴定法测定[10]，土壤颗粒组成采用Mastersize 2000激光粒度分析仪测定。

1.3 数据分析

（1）各粒级土壤团聚体比例计算公式如下[11]：

$$w_i = \frac{w_0}{100} \times 100\% \tag{1}$$

式中：W_i为i粒级团聚体重量占土壤样品干重的比例；W_0为i粒级土壤团聚体重量。

（2）土壤团聚体平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）计算公式如下[12]：

平均重量直径（MWD）：

$$\mathrm{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{2}$$

几何平均直径[13]（GMD）：

$$\mathrm{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \ln \overline{x}_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right] \tag{3}$$

式中：X_i为i粒径范围团聚体的平均直径；W_i为i粒级团聚体重量占土壤样品干重的比例。

（3）土壤团聚体分形维数（D）计算公式如下[14]：

$$\frac{M(r < \overline{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\overline{x}_i}{x_{\max}}\right)^{3-D} \tag{4}$$

对公式两边取对数，可得：

$$\lg\left[\frac{M(r < \overline{X}_i)}{M_T}\right] = (3 - D)\lg\left(\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}}\right) \tag{5}$$

通过数据拟合，可求得D。

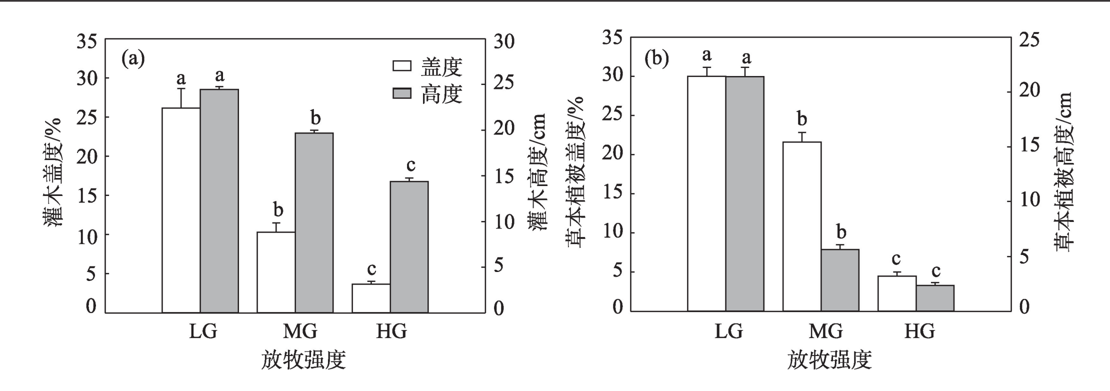
式中：$\overline{X}_i$为i粒径团聚体的平均直径；$M(r<\overline{x}_i)$为粒径小于$\overline{X}_i$的团聚体的重量；M_T为团聚体总重量；$X_{\max}$为团聚体的最大粒径。

采用IBM Statistics SPSS 25.0软件进行数据统计分析，差异显著性检验采用LSD法（$P < 0.05$），用SigmaPlot 14.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对植被特征的影响

荒漠草地灌木的高度及盖度均随着放牧强度的增加而显著降低（$P<0.05$）（图1a），草本植物也呈现出相同的变化趋势（图1b）。与轻度放牧相比，灌木高度在重度放牧下降低了41.1%，盖度降低了22.5%；草本植物高度在重度放牧下降低89.0%，盖度降低86.7%。说明重度放牧会加剧草地植被的退化。



注:LG代表轻度放牧,MG代表中度放牧,HG代表重度放牧;不同小写字母表示植被盖度和高度在不同放牧强度间差异显著 $P<0.05$。下同。

图1 不同放牧强度对植被特征的影响

Fig. 1 Effects of different grazing intensities on vegetation characteristics

2.2 不同放牧强度对土壤理化性质的影响

由表1可知,0~5 cm和10~20 cm土层,LG和MG样地土壤有机C含量无显著差异,但均显著高于HG样地($P<0.05$),0~5 cm和10~20 cm土层土壤有机C含量LG分别较HG高出22.5%和17.8%。而5~10 cm土层土壤有机C含量由高到低的顺序为:LG>MG>HG,MG和HG较LG分别降低了6.0%和15.5%,且不同样地间均表现出显著性差异($P<0.05$)。土壤全N含量的变化趋势和土壤有机C基本一致。0~5 cm和5~10 cm土层土壤C/N值随着放牧强度的增大而逐渐增加,且HG样地显著高于LG样地($P<0.05$),而10~20 cm土层土壤C/N值在各样地间无显著差异($P>0.05$)。

各样地不同土层的土壤容重介于1.33~1.52 g·cm^{-3}(表1)。除0~5 cm土层LG和MG样地间无显著差异外,其他各土层土壤容重均随放牧强度的增加而显著增加($P<0.05$)。不同放牧强度下,土壤颗粒组成中砂粒所占比重最大(73.0%~90.33%),黏粒所占比重最小(1.39%~3.20%)。0~5 cm,5~10 cm和10~20 cm土层的砂粒含量HG显著高于LG($P<0.05$),而粉粒和黏粒含量与前者相反。说明重度放牧会加剧土壤侵蚀,导致土壤中粉粒和黏粒减少。

2.3 不同放牧强度下土壤团聚体组成及稳定性特征

不同放牧强度下,3个粒径的土壤团聚体中均以0.053~0.25 mm粒径所占团聚体总量的比重最大(73.5%~82.2%),0.25~2 mm粒径所占比重最小(3.4%~8.3%)。0~5 cm土层0.25~2 mm粒级的团聚体百分含量LG样地显著高于MG和HG样地(图2a)($P<0.05$),而0.053~0.25 mm和<0.053 mm的团聚体呈现随放牧强度增加而显著增加的趋势($P<0.05$)。5~10 cm和10~20 cm土层各粒级土壤团聚体百分含量在不同放牧强度下的变化趋势(图2b和图2c)与0~5 cm土层基本一致。

表1 不同放牧强度下草地土壤理化性质(平均值±标准误)

Tab. 1 Physicochemical properties of grassland soils under different grazing intensities (Mean±SE)

土层/cm	放牧强度	土壤有机C /(g·kg^{-1})	土壤全N /(g·kg^{-1})	C/N	土壤容重 /(g·cm^{-3})	土壤颗粒组成/%		
						砂粒(>50 μm)	粉粒(2~50 μm)	黏粒(<2 μm)
0~5	LG	4.32±0.10a	0.76±0.03a	5.63±0.01c	1.44±0.03b	82.13±0.14a	15.35±0.13b	2.52±0.02a
	MG	4.14±0.05a	0.74±0.02a	5.73±0.00b	1.43±0.01b	77.02±0.50b	20.49±0.43a	2.49±0.07a
	HG	3.34±0.06b	0.59±0.04b	5.86±0.02a	1.51±0.02a	88.14±0.05c	10.04±0.04c	1.82±0.01b
5~10	LG	4.02±0.08a	0.63±0.02a	6.23±0.07b	1.36±0.01c	73.00±0.25c	23.80±0.21a	3.20±0.04a
	MG	3.78±0.07b	0.58±0.01b	6.41±0.01b	1.40±0.01b	74.69±0.33b	22.55±0.29a	2.76±0.05b
	HG	3.40±0.02c	0.51±0.01c	6.88±0.20a	1.49±0.02a	90.33±0.02a	8.28±0.01b	1.39±0.01c
10~20	LG	3.82±0.02a	0.58±0.02a	6.50±0.01a	1.33±0.01c	76.57±0.26c	20.88±0.23a	2.55±0.03b
	MG	3.79±0.03a	0.57±0.01a	6.56±0.00a	1.38±0.02b	75.60±0.33b	21.22±0.18a	3.19±0.03a
	HG	3.14±0.02b	0.49±0.02b	6.56±0.00a	1.52±0.02a	84.98±0.17a	12.87±0.15b	2.15±0.03c

注:不同字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著 $P<0.05$。下同。

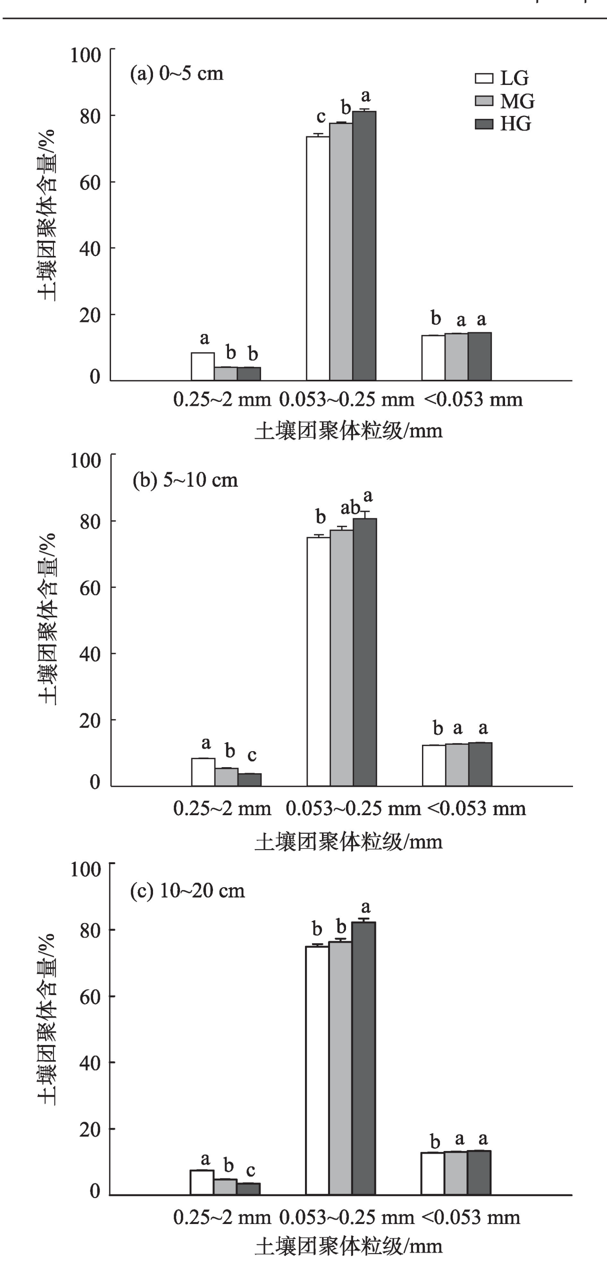


图2 不同放牧强度下土壤各粒级团聚体含量

Fig. 2 Soil aggregate contents of different sizes under different grazing intensities

随着草地放牧强度的增加，各土层的土壤团聚体MWD和GMD值均表现出逐渐降低的趋势（表2），0~5 cm和5~10 cm土层的土壤团聚体MWD值在LG样地显著高于HG样地（$P<0.05$），而10~20 cm土层不同处理间无显著差异（$P>0.05$）；GMD除5~10 cm土层LG样地显著高于HG样地外，其他各土层不同处理间均无显著差异（$P>0.05$）。土壤团聚体D值介于2.61~2.94，且随着放牧强度增加而升高，各土层土壤团聚体D值HG样地均显著高于LG样地（$P<0.05$）。说明随着放牧强度的增加，土壤团聚体稳定性降低，土壤团聚体由大粒径向小粒径转变。

2.4 土壤团聚体有机C、全N含量及分布特征

随着放牧强度的增加，0~5 cm和5~10 cm土层0.25~2 mm和<0.053 mm两个粒级土壤团聚体有机C含量呈完全相反的趋势（图3），0.25~2 mm粒级土壤团聚体有机C含量LG处理显著高于HG处理（$P<0.05$），而<0.053 mm粒级土壤团聚体有机C含量3个土层大致表现为随放牧强度增加而增加的趋势，且各土层HG样地均显著高于LG样地（$P<0.05$）。0.053~0.25 mm粒级土壤团聚体除10~20 cm土层LG处理显著高于其他样地外，其他土层在不同处理间无显著差异（$P>0.05$）（图3a，图3c，图3e）。

各土层不同粒径土壤团聚体全N含量随放牧强度的变化呈现与土壤有机C相似的变化趋势，0.25~2 mm和0.053~0.25 mm粒级团聚体全N含量在多数情况下随放牧强度增加而显著降低（$P<0.05$），而<0.053粒级的全N含量在各土层均表现为HG显著高于LG（$P<0.05$）（图3b，图3d，图3f），MG和LG间无显著差异（$P>0.05$）。

由表3可知，0.053~0.25 mm粒级团聚体C/N值HG样地显著高于LG和MG处理（$P<0.05$），0~5 cm、

表2 不同放牧强度下土壤团聚体稳定性参数（平均值±标准误）

Tab. 2 Stability parameters of soil aggregates under different grazing intensities (Mean±SE)

土层/cm	放牧强度	平均重量直径(MWD)	几何平均直径(GMD)	分形维数(D)
	LG	0.21±0.01a	0.15±0.02a	2.61±0.02b
0~5	MG	0.17±0.02ab	0.14±0.01a	2.87±0.05a
	HG	0.16±0.01b	0.12±0.02a	2.93±0.08a
	LG	0.21±0.01a	0.16±0.02a	2.80±0.03b
5~10	MG	0.18±0.01b	0.15±0.01ab	2.85±0.04ab
	HG	0.17±0.02b	0.13±0.02b	2.91±0.02a
	LG	0.20±0.01a	0.15±0.02a	2.80±0.03b
10~20	MG	0.17±0.01a	0.15±0.01a	2.84±0.03b
	HG	0.17±0.02a	0.14±0.02a	2.94±0.02a

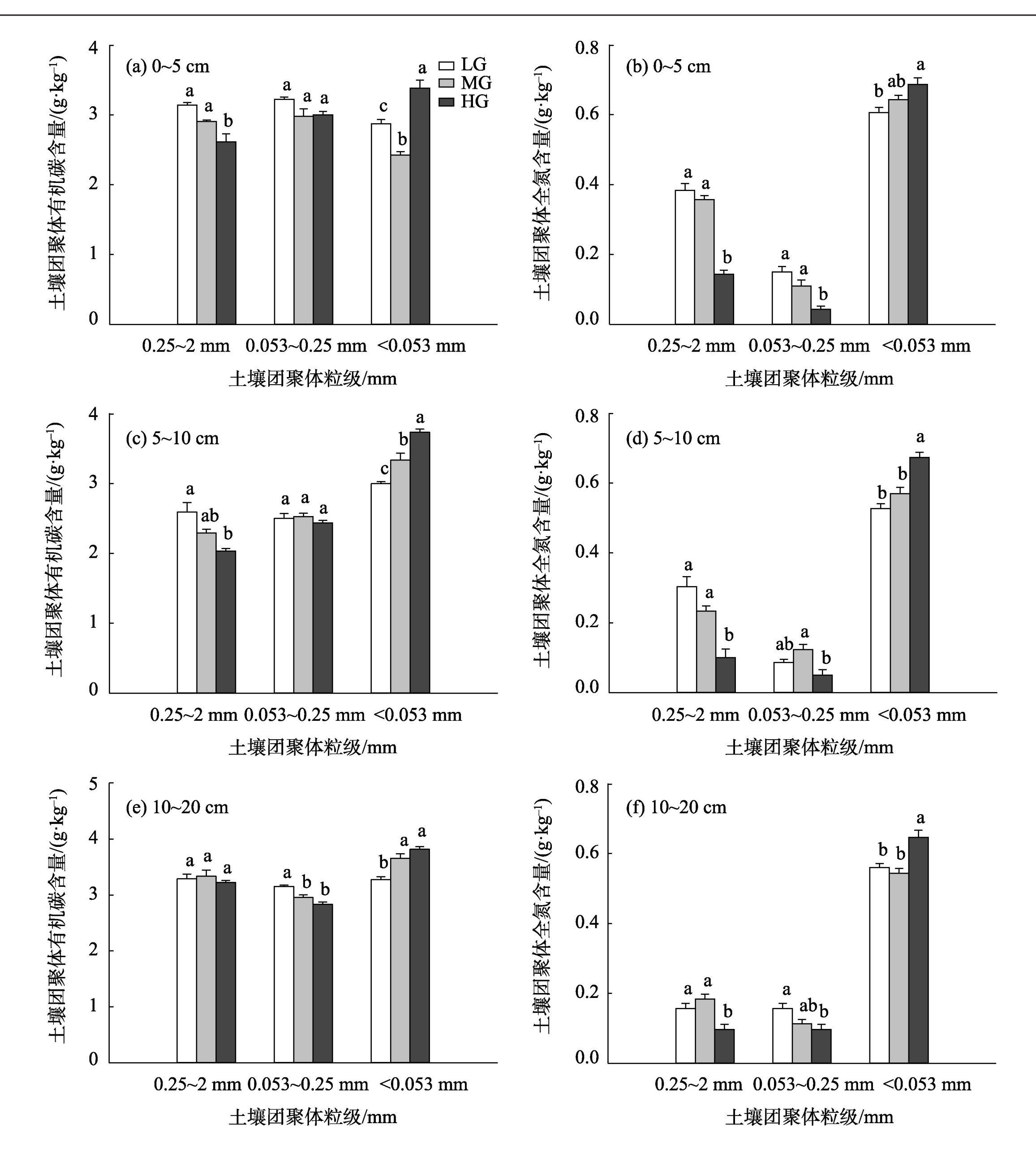


图3　不同放牧强度下土壤团聚体有机C、全N含量

Fig. 3　SOC and total N contents in soil aggregates under different grazing intensities

表3　不同放牧强度下土壤团聚体C/N值(平均值±标准误)

Tab. 3　C/N ratios of soil aggregates under different grazing intensities (Mean±SE)

土层/cm	放牧强度	土壤团聚体C/N值		
		0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	< 0.053 mm
0~5	LG	8.75±0.26b	22.63±1.24b	4.25±0.10a
	MG	8.14±0.15b	27.41±2.01b	4.17±0.05a
	HG	19.40±0.68a	50.99±4.29a	4.21±0.09a
	LG	8.56±0.34b	27.19±1.19b	5.45±0.13a
5~10	MG	12.71±1.09b	17.63±0.76c	5.54±0.03a
	HG	23.05±1.52a	40.19±2.92a	5.43±0.03a
	LG	20.91±1.05b	19.11±0.48b	6.10±0.14a
10~20	MG	18.61±0.97b	21.41±0.41b	6.15±0.06a
	HG	28.63±1.11a	38.68±1.02a	6.06±0.06a

5~10 cm 和 10~20 cm 土层，HG 较 LG 分别增加了 125.3%、47.8%和 102.4%；而各土层<0.053 mm 粒级团聚体 C/N 值不同样地间均无显著性差异（P>0.05）。

3 讨 论

放牧会导致土壤有机 C 含量降低，特别是在生态环境相对脆弱的干旱和半干旱地区[15]。Han 等[16]在内蒙古草甸草原的研究发现，土壤有机 C 含量随着放牧强度的增加而降低，这与本研究的结论一致。放牧强度的增加会导致植被地上生物量下降[3]。本研究中，中度放牧（MG）和重度放牧的样地（HG）灌木盖度分别比轻度放牧样地（LG）降低了 15.9%和 22.5%，灌木高度分别降低了 19.5%和 41.1%。植被盖度降低使得土壤侵蚀加剧，进而造成土壤中黏粒数量的减少。本研究中 0~5 cm，5~10 cm 和 10~20 cm 土层的黏粒含量，重度放牧样地较轻度放牧样地分别减少了 27.8%、56.6%和 15.7%，减弱了黏粒对土壤有机 C 的保护作用，进而导致土壤有机 C 的损失[17]。放牧对土壤全 N 含量的影响不同，有研究认为，放牧对土壤全 N 含量没有影响[18]，另有研究显示，土壤全 N 含量随放牧强度增加而增加[19]，或随放牧强度增加而降低[20]。随着放牧强度的增加，土壤全 N 含量逐渐降低。这一变化主要是受到土壤有机 C 含量减少的影响，当土壤中可利用性 C 相对于 N 缺乏时，N 的固定潜能低，净矿化可能会升高，而放牧强度的增大减少了 C 向地下的分配，可能是导致 N 含量降低的主要原因[21]。

本研究区不同放牧强度下土壤团聚体均以 0.053~0.25 mm 粒级为主。随着放牧强度的增加，0~20 cm 不同土层的土壤团聚体均表现出由大粒径向小粒径转变的趋势，这主要归因于家畜的践踏。家畜践踏使得土壤变得紧实，土壤容重增加，0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤容重在重度放牧下较轻度放牧分别增加了 4.9%、9.6%和 14.3%，进而导致土壤大团聚体发生崩解而转变为小团聚体[22]。另外，0~5 cm 和 5~10 cm 土层土壤团聚体 MWD 值和 GMD 值均呈现出随着放牧强度的增加而逐渐减小的趋势，而 D 值则随着放牧强度的增加而逐渐增大，说明放牧强度的增加导致土壤团聚体稳定性显著降低。其原因可能是，随着放牧强度的增加，归还到土壤中的凋落物数量减少，限制了土壤中微生物的活性，进而导致土壤团聚体形成所需的粘合剂减少[23]，最终使稳定性团聚体数量减少，土壤结构松散，抗侵蚀能力变弱，这与柳妍妍等[24]关于退化草地土壤团聚体稳定性的研究结果相一致。

0~5 cm 和 5~10 cm 土层，大团聚体（0.25~2 mm）中有机 C 含量在重度放牧下较轻度放牧分别降低了 16.9%和 21.9%，而在微团聚体（<0.053 mm）中则分别增加了 18.1%和 24.7%，这可能是因为大团聚体（0.25~2 mm）中的有机质与黏土矿物之间的结合并不紧密[25]，随着放牧强度的增加使土壤团聚体稳定性下降，导致大团聚体中稳定性较差的有机 C 更易于分解。而<0.053 mm 微团聚体中有机 C 可以与土壤黏粒矿物紧密结合，能有效抑制土壤微生物的分解作用[26]，且能够抵抗牛羊践踏等物理扰动，使得<0.053 mm 微团聚体结合的有机 C 能够较稳定地保存在土壤中。

C/N 值可以反映有机质在分解过程中微生物对 N 素的矿化与固持特征。通常认为 C/N 值低于 25~30 时有机质更容易分解，且会出现净 N 矿化[27]。本研究中，各放牧强度下土壤 C/N 值介于 5.6~6.9，表现为净 N 矿化。各放牧强度下的土壤 C/N 值在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层以重度放牧最高，轻度放牧最低，说明放牧强度的增加使土壤 C/N 值也相应增加。0.053~0.25 mm 粒径团聚体在土壤团聚体中所占比重达到 73.5% ~ 82.3%，因此，土壤的 C/N 值主要受到这一粒径团聚体 C/N 值的影响。土壤团聚体的 C/N 值主要受微生物的调控[28]，放牧强度的变化可能导致土壤中的微生物也发生相应变化，最终影响土壤团聚体中的 C/N 值。0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 土层，0.25~2 mm 和 0.053~0.25 mm 粒级的团聚体 C/N 值均表现出重度放牧样地显著高于轻度放牧样地（P<0.05），这可能是因为与轻度放牧样地相比，重度放牧样地家畜践踏使得土壤团聚体中的孔隙度降低，造成团聚体内部缺氧而使土壤处于强还原状态，抑制了好氧型微生物的活性，导致有机 C 分解缓慢，释放的有效 N 较少[29]，从而使这两个粒径的团聚体 C/N 值在重度放牧下显著增加。土壤团聚体 C/N 值是衡量土壤团聚体质量状况和 N 矿化能力的重要指标，重度放牧使土壤团聚体 C/N 值升高，反映出土壤团聚体质量变差，N 的矿化和养分释放过程难以进行，导致植物养分的亏缺[30]。<0.053 mm 的微团聚体 C/N 值在不同放牧强度下无显著差异，可能是由于<0.053 mm 的团聚体中的矿物主要是黏粒

矿物,而黏粒矿物通过粘结作用与团聚体C、N相结合,使它们处在一个相对稳定的物理保护状态[31],不易被微生物分解,使其C/N值对放牧强度的响应较弱。

4 结 论

(1) 放牧强度的增加使荒漠灌丛草地土壤容重升高,土壤有机C和全N含量降低。

(2) 放牧强度的增加造成土壤团聚体结构遭受破坏,稳定性降低,导致草地土壤团聚体由大粒径向小粒径转变,且重度放牧使得土壤团聚体C/N值升高,N的矿化和有效养分释放过程难以进行,易导致植物养分亏缺。

参考文献(References):

[1] 王悦, 王立红, 王德凯, 等. 放牧对矮锦鸡儿种子生产的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 648-652. [Wang Yue, Wang Lihong, Wang Dekai , et al. Effects of grazing on the seed production of *Caragana pygmaea*[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 648-652.]

[2] 赵生龙, 左小安, 张铜会, 等. 乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 168-177. [Zhao Shenglong, Zuo Xiao'an, Zhang Tonghui, et al. Response of relationship between community species diversity and aboveground biomass to grazing intensity in the Urat desert steppe in North China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 168-177.]

[3] 张雪, 乌云娜, 林璐, 等. 放牧梯度上草原植被-土壤系统碳截存特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1789-1795. [Zhang Xue, Wu Yunna, Lin Lu, et al. Carbon sequestration features of grassland vegetation-soil system under different grazing intensities[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1789-1795.]

[4] 沈芳宇, 王永东, 李生宇, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤团聚体特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(5): 910-917. [Shen Fangyu , Wang Yongdong, Li Shengyu, et al. Study on soil aggregates of the desert highway shelterbelt in Tarim[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(5): 910-917.]

[5] 王美佳, 王沣, 苏思慧, 等. 秸秆还田对土壤水稳性团聚体及其碳分布的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 331-338. [Wang Meijia, Wang Feng, Su Sihui, et al. Effects of straw turnover on soil water-stable aggregates and soil carbon distribution[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 331-338.]

[6] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124. [Tian Shenzhong, Wang Yu, Li Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7116-7124.]

[7] 许永霞, 廖超英, 孙长忠, 等. 黄土高原丘陵沟壑区放牧林草地土壤团聚体性质研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 186-191. [Xu Yongxia, Liao Chaoying, Sun Changzhong, et al. Soil aggregate properties of grassland and forest during grazing in hilly and gully areas on the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 186-191.]

[8] 于俊平, 樊学英, 雷霖雯, 等. 关于沙尘暴与草原生态的探讨[J]. 内蒙古草业, 2004, 16(2): 42-43. [Yu Junping, Fan Xueying, Lei Linwen, et al. The exploration of sand storm and steppe ecology[J]. Inner Mongolia Prataculture, 2004, 16(2): 42-43.]

[9] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113. [Wang Xiuying, Gao Xiaofei, Liu Heping, et al. Review of analytical methods for aggregate size distribution and water-stability of soil macro-aggregates[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(3): 106-113.]

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 33-44. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 33-44.]

[11] Beare M H, Hendrix P F, Coleman D C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 777-786.

[12] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil & Tillage Research, 1988, 11(3): 199-238.

[13] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: Tillage and crop effects on as silty loam Mollisol in Illinois [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 49(3): 173-183.

[14] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695-4704. [Li Jianlin, Jiang Changsheng, Hao Qingju, et al. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4695-4704.]

[15] Hiernaux P, Bielders C L, Valentin C, et al. Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands[J]. Arid Environment, 1999, 41(3): 231-245.

[16] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 125(4): 21-32.]

[17] Lynch D L, Cotnoir L J Jr. The Influence of clay minerals on the breakdown of certain organic substrates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(3): 367-370.

[18] Berg W A, Bradford J A, Smis P L. Long-term soil nitrogen and vegetation changes on sandhill rangeland[J]. Journal of Range Management, 1997, 50(5): 482-486.

[19] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 42-48. [Rong Yuping , Han Jianguo , Wang Pei, et al. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties[J]. Grassland of China, 2001, 23(4): 42-48.]

[20] 张伟华, 关世英, 李跃进, 等. 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(4): 61-64. [Zhang Weihua, Guan Shiying, Li Yuejin, et al. Effect of graxing capacity on water content, nutrient and biomass of steppe soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14 (4): 61-64.]

[21] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J].

草业学报, 2010, 19(4): 204−211. [Zhang Chengxia, Nan Zhibiao. Research progress on effects of grazing on physical and chemical characteristics of grassland soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(4): 204−211.]

[22] 李本银, 汪金舫, 赵世杰, 等. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响[J]. 中国草地, 2004, 26(1): 14−17. [Li Benyin, Wang Jinfang, Zhao Shijie, et al. The influence of fertilizers on the soil fertility, population structure and yield of herbages grown in degraded grassland [J]. Grassland of China, 2004, 26(1): 14−17.]

[23] Geng R L, Yu H Y, Ding W X, et al. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizers on organic carbon in aggregates of a sandy loam[J]. Soils, 2010, 42(6): 908−914.

[24] 柳妍妍, 胡玉昆, 公延明. 高寒草原不同退化阶段土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 138−142. [Liu Yanyan, Hu Yukun, Gong Yanming. Fractal dimensions of soil particles in different degenerate stages of alpine steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 138−142.]

[25] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123−130.

[26] 吴庆标, 王效科, 郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 105−109.[Wu Qingbiao, Wang Xiaoke, Guo Ran. Soil organic carbon Stability and Influencing Factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(5): 105−109.]

[27] Feng D, Bao W. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(2): 400−408.

[28] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, et al. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: Influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(6): 1042−1051.

[29] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏, 等. 江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2486−2497. [Zhang Han, Ouyang Zhengcheng, Zhao Xiaoming, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon nitrogen and ratio of carbon to nitrogen in the plow layer of farmland soil in Jiangxi Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6) : 2486−2497.]

[30] 周贵尧. 放牧对草原生态系统碳、氮循环的影响: 整合分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016. [Zhou Guiyao. Effect of Grazing on Carbon and Nitrogen Cycles in Grassland Ecosystem: Meta-analysis [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.]

[31] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491−1494. [Shi Yi, Chen Xin, Shen Shanmin. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (11): 1491−1494.]

Effects of grazing intensity on soil aggregates composition, stability, nutrients and C/N in desert shrubland

QI Zhengchao[1], CHANG Peijing[2,3], LI Yongshan[4], TIAN Xuemei[5], LI Xudong[1], GUO Ding[1], NIU Decao[1]

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, National Demonstration Center for Experimental Grassland Science Education(Lanzhou University), Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Alxa League Meteorological Bureau, Inner Mongolia, Bayan Hot 750306, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Desert Ecological and Meteorological Center, Bayan Hot 750306, Inner Mongolia, China; 4. Luanjingtan Meteorological Station, Inner Mongolia, Gargaresehan 750312, Inner Mongolia, China; 5. Alxa Alliance Grassland Station , Inner Mongolia, Bayan Hot 750306, Inner Mongolia, China)

Abstract: We studied the effects of different grazing intensities upon soil physical-chemical properties, aggregates composition and stability, nutrients, and the C/N ratio in the Alxa desert steppe. We observed that heavy grazing decreased soil's organic carbon and total nitrogen contents in the 0−5 cm, 5−10 cm, and 10−20 cm layers while increased soil's bulk density compared to light grazing. In all layers, 0.053−0.250 mm aggregates were dominant. Both mean weight diameter and geometric mean diameter of soil aggregates decreased, whereas soil fractal dimension increased, indicating damages to the soil aggregates' structure and stability decrease. Heavy grazing decreased larger soil aggregates (0.25−2.00 mm) to smaller ones (0.053−0.250 mm and <0.053 mm) and increased the C/N ratio of soil aggregates, limiting the release of available nutrients and causing nutrients deficiency. We conclude that heavy grazing is a vital degradation factor for the Alxa desert steppe's soils.

Keywords: grazing intensity; soil aggregate; stability; soil nutrients